

ORIGINAL ARTICLE

## 낙동강 강정고령보 상류 퇴적물 측정망 지점의 중금속 오염도 및 대표성 평가

안정민 · 임태호 · 김성민 · 이상수 · 김신 · 이권철 · 김용석 · 양득석\*

국립환경과학원 낙동강물환경연구소

### Evaluating Sediment Heavy Metal Pollution Level and Monitoring Network Representativeness at the Upstream Points of the Gangjeong-Goryeong Weir in the Nakdong River

Jung Min Ahn, Teo Hyo Im, Sungmin Kim, Sangsu Lee, Shin Kim, Kwon Cheol Lee,  
Yong Seok Kim, Deuk Seok Yang\*

National Institute of Environmental Research, Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 40438, Korea

#### Abstract

In this study, heavy metal levels at the sediment monitoring network site upstream of the Gangjeong-Goryeong weir in the Nakdong River were surveyed from 2012 to 2016. We assessed the sediment pollution level using various pollution indexes based on ICP-MS analysis. The stream sediment pollution assessment standard, established through Regulation No. 687 of the National Institute of Environmental Research (2015), pollution load index (PLI), potential ecological risk index (RI), and mean PEL Quotient (mPELQ) were used to evaluate the sediment pollution level. We verified the representativeness of the monitoring point through the distribution of sedimentation and scour behavior by river bed surveying using anacousticDopplercurrentprofiler.

**Key words** : Sediment, Pollution level, Pollution load index, Potential ecological risk index , Mean PEL Quotient

#### 1. 서론

중금속은 인간 활동에 의하여 지속적으로 증가하여 왔으며, 대기를 통한 침전, 산업폐수를 통한 유입 등의 다양한 경로를 통하여 하천으로 유입된다. 이러한 중금속은 미량으로도 수생태계 혹은 인체에 큰 위해성을 초래할 수 있기 때문에 환경오염평가에서 주

요한 대상물질로 구분된다. 하천에 유입되는 오염 물질은 다양한 경로를 통해 환경으로 배출되는데 수계로 유입되는 경우 주로 퇴적물에 축적되게 된다. 퇴적물은 환경 내에서 수층에 존재하는 다양한 오염물질의 저장고 역할을 하는 동시에 재부유나 산화환원 등과 같은 환경 내 물리, 화학적 변화에 의해 수층으로 재용출되므로 잠재적인 오염원의 가능성이 높다.

Received 19 December, 2017; Revised 13 March, 2018;

Accepted 2 April, 2018

\*Corresponding author: Deuk Seok Yang, National Institute of Environmental Research, Nakdong River Environment Research Center, Goryeong 40438, Korea  
Phone: +82-54-950-9720  
E-mail: yds7055@korea.kr

The Korean Environmental Sciences Society. All rights reserved.

© This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

또한 중금속은 일반적으로 환경 중에 낮은 농도로 존재하지만, 환경 내 분해되지 않으며 미량으로도 수생태계에 악영향을 미친다.

이에 따라 하천의 환경을 전체적으로 이해하기 위해서는 활발하게 진행 중인 수질 환경에 기반을 둔 연구뿐만 아니라 퇴적물 내에 축적되는 중금속들을 비롯한 지화학적 성분들을 살피는 것이 중요하다(Thornton, 1983). 수질 분석에 따른 하천 환경 연구는 단기간에 걸쳐 현재의 환경 상태를 이해하는 데에는 매우 유용하지만, 퇴적물 분석 연구는 수질 연구보다 퇴적물 내 축적된 중금속의 농도가 높고, 이동에 제약이 있어 시·공간적으로 변화가 적기 때문에 환경을 평가하고 이해하는 매우 중요한 도구로서 활용이 되고 있다(Ra et al., 2013).

퇴적물 내에 함유되어 있는 미량금속들을 비롯한 화학성분들의 거동을 파악하는 것은 하천의 퇴적환경을 이해할 수 있으며, 여러 환경요인들의 제어를 비롯한 환경적인 접근에 이르기까지 효율적인 대처수단을 제공할 수 있다(Kim et al., 2001). 즉, 환경변화를 파악하기 위해서는 퇴적물 내에 함유된 미량금속 및 화학성분들의 분석이 필수적으로 필요하게 된다. 현재 국내에서는 하천 퇴적물에 관련된 인식이 바뀌고 있으며, 하천의 퇴적물에 관한 연구들도 실시되고 있다. 낙동강유역에서의 퇴적물에 관한 연구는 대부분 연안, 하구역 그리고 삼각주에서 주로 시행되어 왔으며(Lee et al., 2004; Yoon et al., 2008), 낙동강 수계의 분류 및 지류에 분포하는 퇴적물내의 지화학적 연구는 부족한 실정이다.

최근 퇴적물 관리의 필요성이 대두됨에 따라 양질의 저층 퇴적물을 유지하고, 오염원으로서의 작용을 평가하고, 최소화하기 위한 연구들이 진행되어야 하나, 국내의 경우 퇴적물에 관한 연구는 상대적으로 부족하다. 물환경측정망은 환경부고시 제2017-74호(2017.4.13.)에 운영계획이 수립되었으며(Ministry of Environment, 2017), 매년 운영계획이 보완·개정되어 수립되고 있다. 퇴적물측정망은 2012년부터 하천 및 호소 표층퇴적물에 대한 조사를 수행하고 있다. 수저 퇴적물의 환경질 현황 조사 및 평가의 일환으로 퇴적물이 수질과 수생태계에 미치는 영향에 대한 기초자료 확보 차원에서 수행되고 있다. 그러나, 한국은 4

대강 사업으로 하도 준설을 실시하고 보를 설치하였으며, 하천에 인접한 도심 및 산업단지 등의 인위적인 요인으로 인하여 하천의 환경이 많은 영향을 받고 있다(Ahn et al., 2014). 다기능보 설치로 인한 하천 유속의 변화는 체류시간을 증가시켰으며, 유사의 재분배를 야기하였다. 따라서, 중금속 오염도 평가뿐만 아니라 물환경측정망 모니터링 지점에 대한 대표성 검증이 필요하다.

강정고령보 상류 지점 표층 퇴적물의 중금속 오염에 관한 연구는 아직 보고된 바 없기 때문에 본 연구에서는 잠재적인 오염원으로 작용할 수 있는 퇴적물을 대상으로, 하천환경에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 2012년부터 2016년까지 년 2회 강정고령보 상류 다사 및 다사U 지점의 퇴적물시료를 채취하여 중금속에 대해 분석한 후, Pollution Load Index (PLI), potential ecological risk index method (RI) 그리고 mean PEL quotient (mPELQ) 방법을 이용하여 중금속 오염도를 평가하였다. 또한, ADCP를 이용한 하상지형 조사를 통해 퇴적 및 세굴 거동 분포를 파악하였다. 이를 토대로 낙동강수계 중장기 계획의 기초자료 확보 및 모니터링 지점의 대표성을 검증하고, 최종적으로는 물환경측정망 운영계획 고시 개정 등을 마련하여 측정망의 대표성과 정확성을 확보할 수 있는 연구결과를 얻고자 하였다.

## 2. 재료 및 방법

### 2.1. 대상유역

낙동강은 태백산 황지에서 발원하여 남해에 이르기까지 영남지역의 대부분과 강원도와 전라북도의 일부를 포함하여 유역면적 23,817 km<sup>2</sup>, 유로연장 525 km로 우리나라 국토의 약 24%를 차지하는 제 2의 하천이다(Ministry of Land, Infrastructure, and Transport, 2009). 또한 유역 내 안동, 구미, 대구, 부산 등 우리나라 주요 도시를 비롯하여 각종 산업이 발달해 있으며, 유역에 생활하고 있는 1,300 여만 명의 식수원인 각종 생·공업용수(21.6%), 농업용수(51.0%) 및 하천유지용수(27.4%) 등으로 활용되고 있다. 취·정수장 현황으로는 18개의 취수장과 21개의 정수장이 있으며 이중 고도정수처리 시설 13개, 일반정수처리 4개, 강변



Fig. 1. Study area.

여과시설 4개로 구성된다.

낙동강 수계는 62개 지점의 퇴적물측정망이 운영되고 있으며(Ministry of Environment, 2017), 강정고령보 상류에는 2개 지점이 운영 중에 있다(Fig. 1). Fig. 1에서 point 1.은 다사 지점, point 2.는 다사U 지점이다. 강정고령보가 위치해 있는 지점은 2000년에 기존 EL.15.6 m로 유지되던 돌보가 철거되고 EL.14.6 m로 운영될 수 있는 강정취수보가 건설되었으며, 현재는 EL.19.5 m로 관리수위가 유지되는 강정고령보가 건설되어 있다(Fig. 2). 20년이 넘는 기간 동안 보

에 의해 수체가 저류되고 있으며, 저류된 물은 매곡 취·정수장에서 정수하여 대구광역시에 식수로 이용되고 있다. 따라서, 수체의 저류에 따른 유속감소로 장기간에 걸쳐 퇴적물이 발생했을 것으로 판단되며, 저류된 수체가 식수로 이용되는 것을 감안할 때 수질뿐만 아니라 퇴적물에 대한 평가도 필요하다.

## 2.2. 퇴적물 오염도 평가

퇴적물의 오염정도를 평가하기 위한 기법들을 적용하기 위해서는 퇴적물의 배경농도가 중요하다.



(a) 2009.03.26



(b) 2012.05.06

Fig. 2. Aerial photograph on the study area.

**Table 1.** Pollution assessment standards according to stream sediment item

| Item   | Grade            | I      | II      | III      | III      |
|--------|------------------|--------|---------|----------|----------|
| Metals | Copper (mg/kg)   | ≤ 48   | ≤ 228   | ≤ 1,890  | > 1,890  |
|        | Lead (mg/kg)     | ≤ 59   | ≤ 154   | ≤ 459    | > 459    |
|        | Nickel (mg/kg)   | ≤ 40   | ≤ 87.5  | ≤ 330    | > 330    |
|        | Arsenic (mg/kg)  | ≤ 15   | ≤ 44.7  | ≤ 92.1   | > 92.1   |
|        | Mercury (mg/kg)  | ≤ 0.07 | ≤ 0.67  | ≤ 2.14   | > 2.14   |
|        | Iron (mg/kg)     | ≤ 363  | ≤ 1,170 | ≤ 13,000 | > 13,000 |
|        | Cadmium (mg/kg)  | ≤ 0.4  | ≤ 1.87  | ≤ 6.09   | > 6.09   |
|        | Chromium (mg/kg) | ≤ 112  | ≤ 224   | ≤ 991    | > 991    |

※ Pollution assessment standards : normal (all 8 metals are grade I), slightly bad (at least 1 out of 8 metals are grade II or grade III), bad (“metal grade II standard index” 0.34 or higher), very bad (at least 1 metal is grade IV).

Taylor(1964) and Onyari et al.(2003)에 의해 보고된 바에 의하면 중금속들의 세계 평균 농도들은 자국에서의 중요한 배경 값으로 고려된다. 본 연구에서는 퇴적물 오염을 평가하기 위한 퇴적물 중금속 배경농도를 국립환경과학원(NIER, 2011)에서 제시한 하천 퇴적물의 배경농도 값을 이용하였다. 국립환경과학원에서 제시한 배경농도 값은 Pb는 50.2 mg/kg, Zn는 215 mg/kg, Cu는 43.9 mg/kg, Cr는 83.3 mg/kg, Ni는 39.3 mg/kg, As는 14.9 mg/kg, Cd는 0.4 mg/kg, Hg는 0.065 mg/kg, Li는 54 mg/kg과 같다.

#### 2.2.1. 시료채취 및 퇴적물 분석

본 연구에서는 낙동강 강정고령보 상류에 위치해 있는 다사 및 다사U 지점에서 2012년도부터 2016년까지 상·하반기(6, 10월)에 중력식 채취기로 채취기가 바닥에 닿아 줄의 장력이 감소하면 아래 날이 닫히도록 되어있는 포나 그랩(ponar grab)을 이용하여 상부 1~3 cm에 해당하는 표층 퇴적물을 채취하였다. 각 지점은 측선을 기준으로 5개 이상의 시료를 채취하여 혼합하였다. 혼합된 시료는 비금속 재질로 제작된 체(체눈 크기 0.15 mm)로 거른 이후, 체를 통과한 퇴적물, 체거름에 사용한 물을 취하여, 건조시킨 후 0.063 mm 미만으로 분쇄하여 분석용 시료로 이용하였다.

중금속 분석을 위하여 건조되어 분말화 된 시료를 질산(HNO<sub>3</sub>), 과염소산(HClO<sub>4</sub>), 불산(HF)을 순서대로 첨가하여 퇴적물과 산이 완전히 분해될 때까지 가열하였다. 퇴적물이 완전히 분해되면 약 20 mL의 질

산용액(2%)를 가하여 휘발시켜 불산을 제거한 후 다시 질산 용액(2%)을 가하여 용존 시켰다. 이와 같은 전처리 과정을 거친 후 ICP-AES (Inductively Coupled Plasma-Atomic Emission Spectrometry /varian, 720-ES)를 이용하여 Al, Li, Zn, Cr, Pb, Ni, Cu, Cd 등의 총 8개 금속류의 함량을 분석하였다. 본 연구에 이용된 모든 항목의 분석 절차 및 방법은 국립환경과학원의 ‘수질 오염 공정 시험 방법’ 중 ‘하천·호소 퇴적물 공정 시험편’에 의거하였다(MOE, 2012).

#### 2.2.2. 하천 퇴적물 오염평가 기준

환경부 산하 국립환경과학원(National Institute of Environmental Research, NIER)에서는 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준을 2012년 4월 10일에 국립환경과학원예규 제575호로 제정하여, 국가퇴적물측정망을 운영하였고, 이를 보완하기 위해서 2015년 11월 16일 국립환경과학원 예규 제687호로 개정하였다. 하천 퇴적물 항목별 오염평가 기준은 Table 1과 같다. 표에서 제시된 등급별 퇴적물의 상태는 금속류 I 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 거의 없음, II 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있음, III 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 비교적 높음, IV 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 매우 높음 단계로 구분하였다.

#### 2.2.3. Pollution Load Index (PLI)

PLI (Pollution Load Index)는 중금속의 종합적인 오염 부하를 평가하는데 사용되며 본 연구에서는 8개

**Table 2.** Classification of RI and level of contamination

| Potential ecological risk index method (RI) | Level of contamination       |
|---|------------------------------|
| RI < 150                                    | Low ecological risk          |
| 150 < RI < 300                              | Moderate ecological risk     |
| 300 < RI < 600                              | Considerable ecological risk |
| RI > 600                                    | Very high ecological risk    |

중금속 원소를 이용하여 계산하였다. the Pollution Load Index (PLI)는 Concentration Factors (CF)의 합수로서 얻어진다. CF는 각 중금속들의 농도를 나눈 몫으로 얻어진다. PLI는 모든 중금속에 대해 얻어진 n-cfs로부터 n-root를 얻음으로써 계산된다(Soares et al., 1999). PLI는 1보다 크면 오염되었고, 1보다 작으면 오염이 되지 않은 것으로 판정한다(Harikumar et al., 2009). 일반적으로 PLI는 Tomlinson et al.(1980)에 의해 개발되었으며, 식 (1)과 같다.

$$PLI = n \sqrt{CF_1 \times CF_2 \times \dots \times CF_n} \quad (1)$$

여기서, CF : Contamination Factor, n : 중금속들의 개수이다.

2.2.4. Potential ecological risk index method (RI)

Hökanson(1980)는 퇴적물에서의 다양한 중금속 오염의 영향을 평가하기 위하여 potential ecological risk index method (RI)를 제안하였다. RI 값 범위에 따른 오염 정도는 Table 2와 같다. 이 방법에 따르면 RI는 식 (2)와 같다.

$$RI = \sum_{i=1}^n \left( T_i \times \frac{C_i}{C_o} \right) \quad (2)$$

여기서,  $T_i$ 는 독성반응요인 (e.g., Pb = 5, Zn = 1, Cu = 5, Cr = 2, Ni = 5, As = 10, Cd = 30, Hg = 40),  $C_i$ 는 퇴적물에서의 대표중금속,  $C_o$ 는 퇴적물에서의 중금속들의 지역적 배경 값이다.

2.2.5. Mean PEL quotient

Igeo 및 PLI는 개별 혹은 전체 중금속의 오염 정도를 평가하는 것으로, 퇴적물 내 중금속이 담수생물에

위해 영향을 미치는 여부는 판단하지 못하는 단점이 있다. 따라서 퇴적물 내 종합적인 중금속의 독성영향 및 위해성 평가를 위한 mPELQ (mean PEL quotient)를 이용하였고, 이는 식(3)에 의하여 계산된다(Fairy et al., 2001; Hwang et al., 2008). 하천 퇴적물 내 중금속의 PEL 값은 Smith et al.(1996)의 값을 이용하였다.

$$Mean\ PEL\ Quotient = \left( \sum \frac{C_i}{PEL_i} \right) / n \quad (3)$$

여기서,  $C_i$ 와  $PEL_i$ 는 각 중금속의 농도와 Smith et al.(1996)에 의해 제시된 PEL 값, n은 사용된 미량금속 원소의 개수이다. 본 연구에서는 PEL 기준이 존재하는 8개 원소 (Pb, Zn, Cu, Cr, Ni, As, Cd, Hg)를 이용하였다. mPELQ 값이 0.1 이하는 독성영향이 없으며, 0.1~1.0은 독성영향이 작지만 존재하고, 1 이상의 경우에는 독성영향이 매우 큰 것으로 구분된다(Fairy et al. (2001).

2.3. 퇴적물 공간적 분포

퇴적물 공간적 분포 관측을 위해 낙동강 강정고령보 상류의 하상 지형조사는 Acoustic Doppler Current Profiler (ADCP)을 이용하여 수행하였다(Table 3). 조사지역의 수심 분포와 하상면의 지형 특성을 파악하기 위해 싱글빔 음향 측심기를 이용하였으며, 조사에서는 탐사선의 수직인 방향의 일정폭으로 싱글빔 자료를 얻어 측심하는 음향 측심기가 사용되었다. ADCP는 유속 및 유량 등 수리량 측정에 많이 사용되지만 하상 지형조사 등에서도 음향측심기를 이용하여 하상조사를 수행할 수 있다. 낙동강 강정고령보 상류의 하상 지형조사는 시행함에 있어 하천에서 정확한 위치 확보는 매우 중요한 문제로 싱글빔(SBES) 정밀 하상지형조사의 제반조사 위치를 위하여 DGPS

**Table 3.** Equipment specification

| Velocity measurement       |   |
|----------------------------|---|
| Profiling range (distance) | 0.06 to 40m                                       |
| Profiling range (velocity) | ±20 m/s   |
| Accuracy                   | ±0.25% of measured velocity                       |
| Resolution                 | 0.001 m/s   |
| Number of cells            | Up to 128   |
| Cell size                  | 0.02 to 4m  |
| Transducer configuration   | Nine (9) transducers                              |
|                            | Dual 4-beam 3.0 MHz/1.0 MHz                       |
|                            | Janus at 25° slant angle<br>0.5 MHz vertical beam |
| Depth measurement          |   |
| Range                      | 0.20 to 80m                                       |
| Accuracy                   | 1%  |
| Resolution                 | 0.001 m   |
| Discharge measurement      |   |
| Range with bottom-track    | 0.3 to 40m  |
| Range with RTK GPS         | 0.3 to 80 m                                       |
| Computations               | Internal  |

(Differential Global Positioning System) 방법을 이용하여 결정하였다. Trimble DGPS에 의해 위치를 결정하였으며, beacon 방식으로 위성별 거리오차를 보정하여 정밀 해상 위치를 결정하는 장비이다. DGPS는 육상의 DGPS 기준국(국토교통부 영도, 사용주파수 300 kHz)에서 보내주는 표준 DGPS 보정메시지인 RTCM-104 (the radio technical commission for maritime services) 프로토콜을 Beacon 수신기에서 수

신, GPS 수신기로 송신하여 해상의 위치를 결정한다. DGPS의 위치 정보를 이용하여 navigation S/W (navi-pac)에서 실시간으로 조사선의 위치를 모니터링하여 조사계획 항적선에 일치하도록 유도하였다.

본 연구에서 사용하는 위치 정보는 WGS84 좌표계를 UTM (Universal Transverse Mercator, 52S zone) 직교좌표로 변환하여 사용하였으며, 좌표 변환 변수는 Table 4와 같다. 싱글빔 음향측심기를 보트에 설치

**Table 4.** System and transformation parameters for coordinate

| Type             | Coordinate transformation parameters |
|------------------|--------------------------------------|
| Ellipsoid        | WGS84                                |
| Projection       | UTM (Universal Transverse Mercator)  |
| Zone             | 52S                                  |
| Central meridian | 129° 00' 00" E                       |
| Origin latitude  | 00° 00' 00" N                        |
| Scale factor     | 0.9996                               |
| False easting    | 500,000                              |
| False northing   | 0                                    |

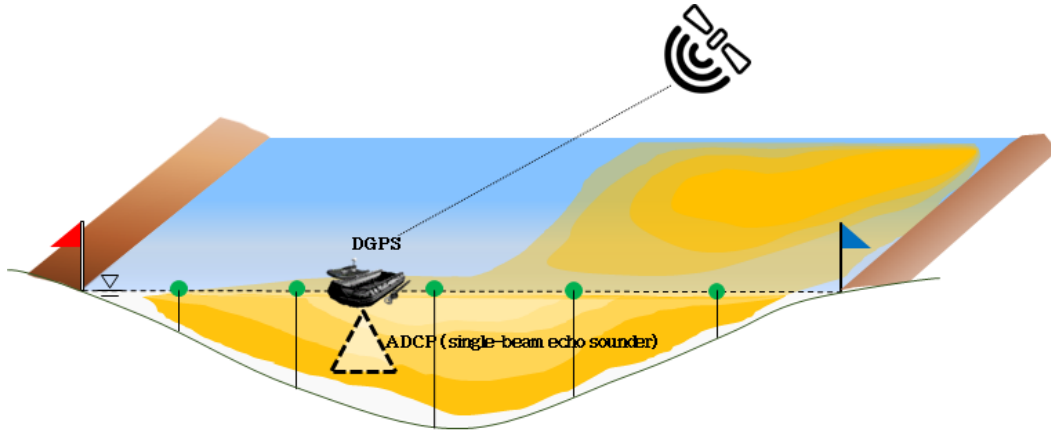


Fig. 3. Concept of river bed surveying.

할 때 발생하는 여러 가지 offset에 대해 검교정을 실시하여 보정치를 계산하였다. 검교정을 통하여 계산된 보정치를 자료취득 시 또는 자료 처리 과정에서 적용하여 자료에 대한 정밀도를 향상시켰다. 수중에서는 수심에 따라 음속도가 변화하기 때문에 수심에 대한 음속도를 측정해야 하며, 수중에서의 음속도 변화를 측정하기 위해 수직 음속도 측정기(SVP: Sounder Velocity Profiler)를 이용하여 수층의 음속도를 측정하여 자료취득 시 실시간으로 보정을 실시하였고, 일정 시간 간격으로 측정하여 2차 음속도 보정을 후처리 방식으로 실시하였다. 또한, 수면은 조석 및 수위관리의 영향으로 수심을 측정하는 동안에 계속적으로 변한다. 따라서 수면의 변화를 일정 간격으로 측정하여 같은 시간에 측정한 수심을 보정하였고, 수심측량에서는 수위의 보정이 필수적으로 수행되어야 하는 중요한 사항이기 때문에 수심 측량 동안 한국수자원공사에서 운영하고 있는 수위관측 성과를 이용하여 수위 보정을 하였다. ADCP를 이용한 하상지형측량 개념도는 Fig. 3과 같이 위성에서 받은 위치좌표를 DGPS에서 수신하고, ADCP의 single-beam (SBES)을 이용하여 측정하는 것이다.

### 3. 결과 및 고찰

#### 3.1. 퇴적물 오염도 평가 결과

Table 5는 2012년부터 2016년 까지 각 년별 상하

반기에 대해 강정고령보 상류에 위치해 있는 다사U 및 다사 지점에 대한 퇴적물 중금속 농도를 분석한 결과이다. 또한, 표층퇴적물의 중금속 농도에 따른 오염의 정도를 파악하기 위하여 Table 1의 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준을 이용하여 평가하였다. 2012년부터 2016년까지 분석된 중금속 농도 결과를 토대로 오염등급을 평가한 결과에서는 대부분의 등급이 I 등급 수준으로 나타났다. 금속류는 I 등급은 저서생물에 독성이 나타날 가능성 거의 없으나, II 등급의 경우 우려할 수준은 아니지만 저서생물에 독성이 나타날 가능성 있기 때문에 추가적으로 PLI, RI 그리고 mPELQ를 이용하여 오염도 및 독성도를 평가하였다.

PLI는 중금속의 종합적인 오염부하를 평가하는데 사용되며, 본 연구에서는 8개 중금속 원소를 이용하여 계산하였다(Fig. 4). 다사 및 다사U 지점에서는 2012~2016년 반기별로 측정된 퇴적물 오염도 평가 결과, 전체 시료에서 1 이하의 결과가 도출되었다. PLI 값이 1 이상의 경우에는 인위적인 오염이 존재하지만 PLI 값이 1 보다 작으면 오염이 존재하지 않는 것을 의미한다. Hökanson(1980)에 의해 개발된 정량적 접근으로서 퇴적물에서의 다중 중금속 오염도의 효과를 평가할 수 있는 RI를 이용하였다. 다사 및 다사U 지점의 2012~2016년 반기별로 측정된 퇴적물 RI 오염도 평가 결과, 전체 시료에서 100이하의 값을 나타냈으며 “low ecological risk” 상태로 볼 수 있다(Fig. 5). mPELQ를 이용한 독성도 평가 결과에서도 전체 시료

Table 5. Results of pollution assessment at the points(Unit : mg/kg)

| Year | Half   | Point |       | Pb   | Zn    | Cu   | Cr   | Ni   | As   | Cd   | Hg    |    |
|------|--------|-------|-------|------|-------|------|------|------|------|------|-------|----|
| 2012 | First  | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     |    |
|      |        |       | Con.  | 15.0 | 55.5  | 9.1  | 23.4 | 8.1  | 6.8  | 0.40 | 0.003 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | II    | I  |
|      |        |       | Con.  | 19.2 | 99.6  | 18.7 | 34.1 | 13.8 | 9.0  | 0.59 | 0.026 |    |
|      | Second | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 13.3 | 66.2  | 10.4 | 21.0 | 7.5  | 6.1  | 0.21 | 0.012 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 14.0 | 86.6  | 14.8 | 28.1 | 10.3 | 5.9  | 0.34 | 0.025 |    |
| 2013 | First  | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     |    |
|      |        |       | Con.  | 18.7 | 92.3  | 12.6 | 38.5 | 13.8 | 7.7  | 0.32 | 0.028 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 13.2 | 47.7  | 5.4  | 26.9 | 8.4  | 4.9  | 0.17 | 0.007 |    |
|      | Second | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 16.3 | 43.7  | 5.0  | 33.5 | 11.3 | 5.1  | 0.13 | 0.030 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 17.4 | 63.1  | 6.8  | 32.0 | 11.1 | 5.6  | 0.21 | 0.013 |    |
| 2014 | First  | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     |    |
|      |        |       | Con.  | 20.5 | 113.7 | 15.0 | 50.9 | 16.1 | 9.6  | 0.33 | 0.029 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 14.5 | 53.6  | 5.1  | 26.7 | 8.8  | 5.7  | 0.11 | 0.008 |    |
|      | Second | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | II   | I     |    |
|      |        |       | Con.  | 28.6 | 175.8 | 25.9 | 51.3 | 26.4 | 12.4 | 0.51 | 0.057 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | II    | I  |
|      |        |       | Con.  | 23.5 | 134.0 | 18.0 | 44.6 | 19.7 | 9.6  | 0.51 | 0.037 |    |
| 2015 | First  | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | II    |    |
|      |        |       | Con.  | 33.4 | 189.6 | 29.2 | 67.0 | 33.1 | 11.2 | 0.34 | 0.077 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | II |
|      |        |       | Con.  | 31.3 | 171.1 | 27.1 | 62.5 | 26.8 | 9.9  | 0.32 | 0.081 |    |
|      | Second | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 30.8 | 82.6  | 13.6 | 73.9 | 22.1 | 6.6  | 0.19 | 0.012 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 37.4 | 133.9 | 20.9 | 54.6 | 29.5 | 8.2  | 0.31 | 0.030 |    |
| 2016 | First  | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | II    |    |
|      |        |       | Con.  | 33.2 | 174   | 22.4 | 64.4 | 31.6 | 11   | 0.35 | 0.074 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 29.6 | 127.3 | 13.4 | 49.2 | 23   | 6.8  | 0.29 | 0.044 |    |
|      | Second | DasaU | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | I     | I  |
|      |        |       | Con.  | 20.2 | 57.0  | 8.9  | 20.4 | 10.0 | 4.5  | 0.27 | 0.019 |    |
|      |        | Dasa  | Level | I    | I     | I    | I    | I    | I    | I    | II    | I  |
|      |        |       | Con.  | 26.6 | 120.4 | 18.2 | 32.8 | 19.0 | 7.1  | 0.49 | 0.038 |    |



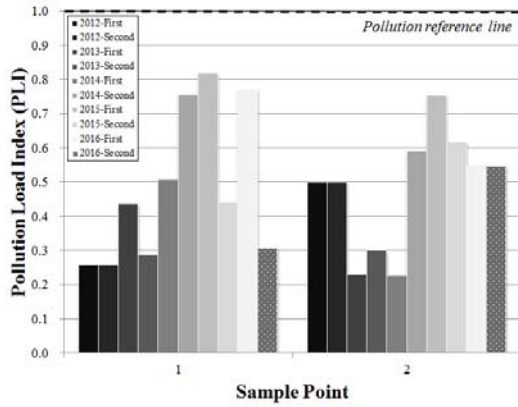


Fig. 4. Result of PLI analysis.

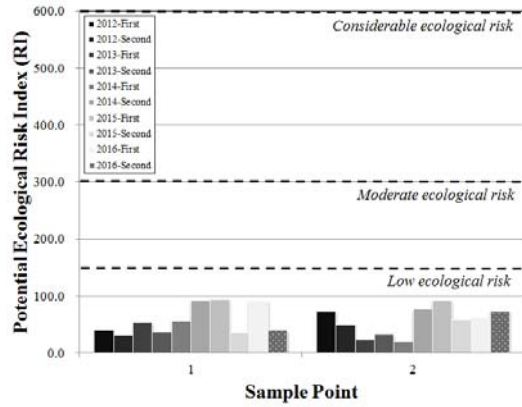


Fig. 5. Result of RI analysis.

에서 0.2~0.5의 범위로 나타났으며, “toxic reference line” 이하로 나타났다. 이는 독성이 존재하지만 독성 영향이 작다고 판단할 수 있다(Fig. 6). 물환경측정망 운영계획에서 제시하고 있는 하천·호소 퇴적물 오염 평가 기준, PLI, RI 그리고 mPELQ를 이용하여 오염도 및 독성을 분석한 결과를 종합적으로 고려해 볼 때 강정고령보 상류 지점의 퇴적물은 중금속 오염이 되지 않은 것을 알 수 있다.

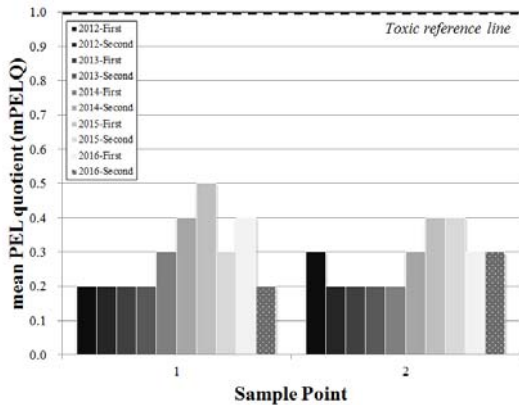


Fig. 6. Result of mPELQ analysis.

### 3.2. 퇴적물 공간적 분포 결과

Fig. 7과 8은 낙동강 성주대교 부터 강정고령보까지의 하상지형조사 결과이다. 4대강살리기 사업을 통해 달라진 하천 하상의 물리적 형상에 대한 정밀하상

측량 조사 결과가 없기 때문에, 본 연구에서는 하상지형조사를 수행하였다. 낙동강, 백천 그리고 신천 합류부 하상지형조사 결과에서는, 합류부에서 낙동강 우안부분 퇴적이 지배적이었으며, 백천 말단부 지점은 퇴적이 지배적인 적으로 나타났다. 백천과 신천 합류부 낙동강 본류에서 퇴적이 발생하는 것으로 나타났다. 2017년 물환경측정망 운영계획에 의하면, 다사와 다사U 지점은 강정고령보 상류에 위치해 있다. 다사(point 1.)는 강정고령보 500 m 지점에 위치해 있으며, 다사U(point 2.)는 강정고령보 상류 약 5.2 km에 위치해 있다. Fig. 7과 8에 제시된 그림을 보면 강정고령보 상류 500 m 지점보다 강정고령보 직상류에서 퇴적이 지배적으로 일어나고 있는 것을 알 수 있다. 따라서 다사지점의 경우, 상류 500 m 보다 강정고령보 직상류(100 m)로 시료채취 지점을 옮기는 것이 퇴적물 지점의 대표성을 높일 수 있다.

또한, 다사U 지점의 경우에도, 세굴이 지배적인 것을 알 수 있다. 퇴적물측정망 지점의 대표성을 높이기 위해서는 상류로 시료채취 지점을 이전하여 퇴적물 시료를 채취하는 것이 대표성을 높일 수 있을 것으로 판단된다. 퇴적물측정망의 경우, 낙동강 수계는 2017년 물환경측정망 운영계획에 의해 62개 지점이 운영되고 있다. 백천의 경우에는 퇴적물측정망이 운영되고 있지 않으나, 신설하게 된다면 Fig. 7과 8에 도시된 결과를 토대로 퇴적물측정망 지점을 신설할 수 있을 것으로 판단되고, 향후 다음과 같은 측정방법을 통하여

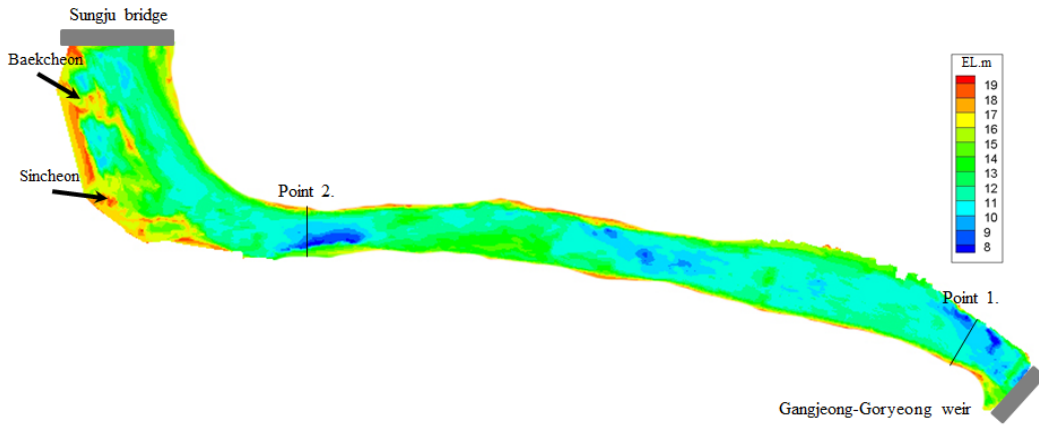


Fig. 7. Result of river bed surveying (2D).

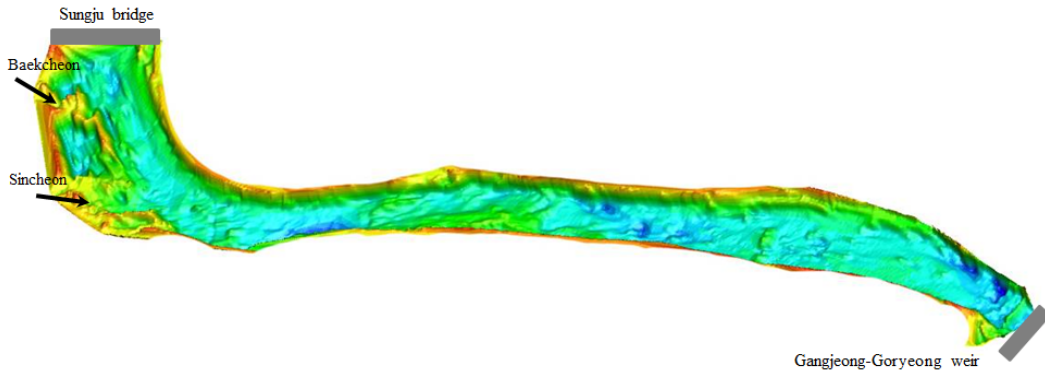


Fig. 8. Result of river bed surveying (3D).

퇴적거동을 평가한 이후, 퇴적물측정망 기존 지점 및 신설 지점에 대한 검토가 필요할 것으로 판단된다.

또한, 다차원수치모형을 이용한 수질, 유사이송 그리고 하상변동 해석에서 우선적으로 정밀하게 구동되어야 하는 것이 수리해석이다. 정밀한 수리해석을 위해서는 정확한 지형자료를 입력하는 것이 중요하다. 따라서, Fig. 7과 8에 제시된 바와 같은 정밀한 하상지형은 국립환경과학원에서 운용중인 수질예보시스템의 입력자료로 활용되어 수질예보결과의 신뢰성을 높일 수 있을 것으로 판단된다.

#### 4. 결론

본 연구에서는 강정고령보 상류에 위치해 있는 퇴적물측정망 지점에 대해 다양한 오염지수를 활용하여

퇴적물 오염도를 평가하였다. 또한, ADCP를 이용한 하상지형 조사를 통해 퇴적 및 세굴 거동 분포를 파악하였다. 퇴적물 거동 평가를 통해 모니터링 지점의 대표성을 검증하였다.

1) 강정고령보 상류 지점은 매곡 취·정수장에서 정수하여 대구광역시에 식수로 이용되고 있기 때문에 수질뿐만 아니라 퇴적물에 대한 평가도 필요하다. 하천·호소 퇴적물 오염평가 기준, PLI, RI 그리고 mPELQ를 이용하여 오염도 및 독성을 분석한 결과를 종합적으로 고려해 볼 때 강정고령보 상류 지점의 퇴적물은 중금속 오염이 우려할 수준은 아닌 것으로 확인되었다. 하지만, 간헐적으로 Cd와 Hg가 특정시기에 II 등급으로 나타났고, 하천·호소 퇴적물 지점별 오염평가 기준에서 금속류 8 항목 중 'II' 등급 또는 'III'

등급 항목이 1개 이상일 경우 저서생물에 독성이 나타날 가능성이 있으며, 독성시험을 통해 악영향 확인이 필요하다고 명시되어 있다. 따라서 향후 연구로서 ASTM(2010)에서 제시된 단각류(*Hyalella azteca*)를 이용한 하천 퇴적물 생태독성에 대해 평가할 필요가 있다. 생태독성에 대한 평가를 토대로 사람 또는 생물에 대한 독성 유무를 파악할 수 있을 것이다.

2) 본 연구에서 수행된 퇴적물의 공간적 분포 결과를 이용하여, 퇴적 및 세굴 거동 분포를 파악한 결과, 다사U 및 다사 지점은 시료채취 지점을 옮길 필요가 있는 것으로 나타났다. 다사 지점의 경우 강정고령보 직상류에서 퇴적이 지배적이기 때문에 현재 강정고령보 상류 500 m에서 100 m로 조정할 필요가 있으며, 다사U지점의 경우 세굴이 지배적이기 때문에 시료채취 지점을 강정고령보 상류 5.2 km에서 6 km로 조정할 필요가 있다.

3) 4대강사업 이후 낙동강은 하천 물리적 환경변화 및 유수역에서 정수역으로 변화됨에 따라 보-보 구간에 대한 퇴적물 관리가 지역현안으로 대두되고 있다. 하상퇴적물의 오염물질 분포 및 기여도를 평가함으로써 향후 수질오염 지표자료로 활용하고, 낙동강 수계 퇴적물 조사를 통하여 보 준설 기준 및 환경정책수립 등 수질관리정책에 반영할 수 있을 것으로 판단된다.

4) 국내의 경우 퇴적물에 대한 연구는 해양 퇴적물에 관련된 내용이 대다수이며, 담수 퇴적물에 대한 연구는 간헐적으로 수행되고 있다. 또한, 퇴적물의 농도와 관련된 연구만 진행되고 있고, 양에 대한 연구는 전무한 실정이다. 장기적으로 퇴적물에 대한 연구는 퇴적물 양과 질을 동시에 검토해야 되며, 본 연구에서 도출된 공간적 분포 결과를 토대로 향후 동일한 연구대상구간에 대해 추가적으로 공간적 분포를 측정하여 현재 결과와 비교한다면 퇴적물 양에 대한 연구결과도 도출될 것으로 판단된다. 따라서, 낙동강수계에 위치해 있는 8개 다기능보의 보-보 구간에 대한 퇴적물 양과 질에 대한 퇴적물 정밀 조사가 필요하다.

### 감사의 글

본 논문은 환경부의 재원으로 국립환경과학원의 지원(과제번호 : NIER-2017-01-01-081)을 받아 수행

하였습니다.

### REFERENCES

- Ahn, J. M., Lee, S. J., Kang, T., 2014, Evaluation of dams and weirs operating for water resource management of the Geum River, *J. Sci. Total Environ.*, 478, 103-115.
- ASTM, 2010, Standard test method for measuring the toxicity of sediment - associated contaminants with freshwater invertebrates, E1705-05.
- Fairy, R., Long, E. D., Roberts, C. A., Anderson, B. S., Phillips, B. M., Hung, J. W., Puckett, H. R., Wilson, C. J., 2001, An Evaluation of methods for calculating, mean sediment quality guideline quotients and indicators of contamination and acute toxicity to amphipods by chemical mixtures, *Environ. Toxicol. Chem.*, 20, 2276-2286.
- Harikumar, P. S., Nasir, U. P., Mujeebu, M. P., Rahma, 2009, Distribution of heavy metals in the core sediments of a tropical wetland system, *International Journal. Environmental Science Technology*, 6, 225-232.
- Hökanson, L., 1980, Ecological risk index for aquatic pollution control, A sedimentological approach, *Water Research*, 14, 975-1001.
- Hwang, H. M., Green, P. G., Young, T. M., 2008, Tidal salt marsh sediment in California, USA; part 3. current and historic toxicity potential of contaminants and their bioaccumulation, *Chemosphere*, 71, 2139-2149.
- Kim, J. Y., Eun, G. Y. N., Koh, Y. K., Youn, S. T., Oh, K. H., Kim, D. J., 2001, Sedimentary environments and geochemical characters of the core sediments near Naju-Yeongam area in the lower part of the Yeongsan River, Cheonnam, Korea, *J. Kor. Earth Sci. Soc.*, 22, 301-316.
- Lee, I. C., Kim, K. H., Ryu, C. R., Kim, Y. T., 2004, A Study on the analysis of behavior of inflowing sediments in Nakdong River estuary, *J. Ocean Eng. Tech.*, 218-222.
- Ministry of Environment (MOE), 2012, Official test methods of water quality, notification No. 2012-99, Ministry of Environment, 1-333.
- Ministry of Environment, 2017, Water environmental monitoring network operation plan.
- National Institute of Environmental Research (NIER),

- 2011, Baseline concentrations of heavy metals in river sediments in Korea, Ministry of Environment, 1-138.
- National Institute of Environmental Research (NIER), 2015, Regulation No. 687, sediment pollution evaluation standards, Incheon, Republic of Korea.
- Onyari, M. J., Muohi, A. W., Omomdi, J., Mavuti, K. M., 2003, Heavy metals in sediments from Makupa and Port-Reitz creek system, Kenyan Coast Environ. Int., 28, 639-647.
- Ra, K. T., Kim, E. S., Kim, J. K., Kim, K. T., Lee, J. M., Kim, E. Y., 2013, Distribution and pollution assessment of trace metals in core sediments from the artificial lake Shihwa, Korea, J. Oce. Pol. Res., 35, 69-83.
- Smith, S. L., MacDonald, D. D., Keenleyside, K. A., Ingersoll, C. G., Field, J., 1996, A Preliminary evaluation of sediment quality assessment values for freshwater ecosystem, J. Great Lakes Res., 22, 624-638.
- Soares, H. M., Boaventura, R. A. R., Esteves da Silva, J., 1999, Sediments as monitors of heavy metal contamination in the Ave River Basin (Portugal): multivariate analysis of data, Environmental Pollution, 105, 311-323.
- Taylor, S. R., 1964, Abundance of chemical elements in the continental crust: A New table, Geochimica et Cosmochimica. Acta., 28, 1273-1285.
- Thornton, I., 1983, Applied environmental geochemistry, Academic Press, London, 1-501.
- Tomlinson, D. L., Wilson, J. G., Harris, C. R., Jeffney, D. W., 1980, Problems in the assessment of heavy metal levels in estuaries and the formation of a pollution index, Helgol. Wiss. Meeresunters, 33, 566-572.
- Yoon, E. C., Lee, J. S., 2008, Characteristics of seasonal variation to sedimentary environment at the estuary area of the Nakdong, Journal of Korean Society of Coastal and Ocean Engineers, 20, 372-389.